МАШИНОСТРОЕНИЕ

CC BY

Научная статья
УДК 331.45
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-49-68

Исследование эффективности алюминиевых элементов пассивной безопасности в автомобиле на основе компьютерного моделирования

Л. А. Жуков, А. Л. Кузьминов
Череповецкий государственный университет (г. Череповец, Российская Федерация)

Введение. Выполнено исследование энергопоглощающего элемента (ЭПЭ) из алюминиевого сплава, который является частью пассивной системы безопасности гоночного автомобиля. Проектирование и тестирование энергопоглощающего элемента выполнено в рамках технического регламента международных студенческих инженерных соревнований Formula SAE. Formula SAE — это инженерные соревнования студенческих команд, организованные Обществом автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers, SAE).
Проектирование и анализ динамических показателей объекта исследования проводились в системе автоматизированного проектирования (САПР) Ansys® Workbench SpaceClaim и Ansys Explicit Dynamics.
Постановка задачи. Задачей данного исследования является анализ эффективности применения алюминиевого сплава в качестве основного материала для изготовления энергопоглощающего элемента системы пассивной безопасности автомобиля.
Теоретическая часть. В качестве перспективных моделей энергопоглощающих элементов было разработано 11 их конструкций разной формы (структуры) из алюминиевого сплава 6063. Была проведена симуляция краш-теста (фронтальный удар и удар с перекрытием), в результате которого исследовано протекание деформации в конструкции автомобиля и установлены основные зоны напряженности и нагрузки. Проведенное исследование энергопоглощающих элементов может быть использовано при обосновании выбора материала для изготовления пассивных систем безопасности автомобиля автопроизводителями и машиностроительными предприятиями.
Выводы. Результатом исследования является смоделированный процесс разрушения (деформации) энергопоглощающего элемента, отвечающего за поглощение энергии в случае фронтального удара и удара с перекрытием. Исследовано влияние материала и формы энергопоглощающего элемента на качественные и количественные характеристики пассивной системы безопасности автомобиля. Изучены нагрузки и напряжения, возникающие в конструкции энергопоглощающего элемента. Доказана эффективность использования алюминиевого сплава в перспективных элементах пассивной безопасности автомобиля. Проведенные симуляции краш-тестов показали, что использование прогрессивных материалов конструктивных элементов пассивной безопасности транспортных средств, а именно алюминиевых сплавов в оптимизированном в результате моделирования исполнении, позволяет добиваться высоких показателей защищенности экипажа автомобиля.
Анализ распределения величины поглощенной энергии помогает выявить направление для дальнейшего усовершенствования систем пассивной безопасности автомобиля. Установлено влияние материала изготовления энергопоглощающего элемента на протекающие процессы во время фронтального удара. Разработана универсальная технология проведения краш-теста (моделирование процессов соударения) энергопоглощающего элемента с жесткой преградой в ПО Ansys. Исследовано процентное отношение (перераспределение) поглощаемой энергии фронтальными элементами пассивной безопасности автомобиля.

Ключевые слова: энергопоглощающий элемент, алюминиевый сплав, деформация, эффективность, краш-тест, система пассивной безопасности автомобиля.

Для цитирования: Жуков, Л. А. Исследование эффективности алюминиевых элементов пассивной безопасности в автомобиле на основе компьютерного моделирования / Л. А. Жуков, А. Л. Кузьминов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 2. — С. 49–68. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-49-68

Original article

Research on the effectiveness of aluminum passive safety elements in cars based on computer simulation

L. A. Zhukov, A. L. Kuzminov
Cherepovets State University (Cherepovets, Russian Federation)

Introduction. The research of energy-absorbing element made of aluminum alloy, which is part of the passive safety system of a racing car, is carried out in the article. Designing and testing of the energy absorbing element was performed within the framework of the technical regulations of the international student engineering competition Formula SAE. Formula SAE is an engineering competition of student teams organized by the Society of Automotive Engineers (SAE).
The design and analysis of the dynamic performance of the research object were performed in the computer-aided design system (CAD) ANSYS® Workbench SpaceClaim and ANSYS Explicit Dynamics.
Problem Statement. The task of this research is to analyze the effectiveness of the use of aluminum alloy as the main material for the manufacture of the energy-absorbing element of the passive safety system of the car.
Theoretical Part. Eleven structures of different shapes (structures) made of aluminum alloy 6063 were developed as promising models of energy-absorbing elements. A simulation crash test (frontal impact) was carried out, as a result of which it was possible to study the flow of deformation in the structure, to find the main zones of stress and load. This study of energy-absorbing elements can be used to justify the choice of material for the manufacture of passive car safety elements by car manufacturers and machine builders.
Conclusions. The result of the research is a simulated process of destruction (or deformation) of the energy-absorbing element responsible for the absorption of energy in case of a frontal impact. The dependence of the manufacturing material and the shape of the energy absorbing element on the qualitative and quantitative characteristics of the passive car safety system has been investigated. Loads and stresses appearing in the structure of energy absorbing element have been studied. The efficiency of using aluminum alloy in promising car passive safety elements has been proved. Simulations of crash-tests showed that the use of progressive materials of construction elements of passive safety of vehicles, namely, aluminum alloys in an optimized (as a result of modeling) performance allows you to achieve high levels of protection of the pilot and passengers of the vehicle.
The analysis of the absorbed energy value distribution allows revealing the direction for further improvement of the car passive safety systems. The influence of energy absorbing element manufacturing material on the processes occurring during frontal impact has been established. A universal technology of crash-testing (modeling of impact processes) of an energy absorbing element with a rigid obstacle has been developed in Ansys software. The percentage ratio (redistribution) of energy absorbed by frontal elements of passive safety of the car has been investigated.

Keywords: energy absorbing element, aluminum alloy, deformation, efficiency, crash test, vehicle passive safety system.

For citation: Zhukov L. A., Kuzminov A. L. Research on the effectiveness of aluminum passive safety elements in cars based on computer simulation. Safety of Technogenic and Natural Systems. 2022;2:49−68. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-49-68

Введение. Автомобиль — это самый распространенный наземный вид транспорта в мире по состоянию на 2022 год. Так, в Российской Федерации автомобильный вид транспорта занимает 61,6 % от общего объема пассажирских перевозок (рис. 1) [1].

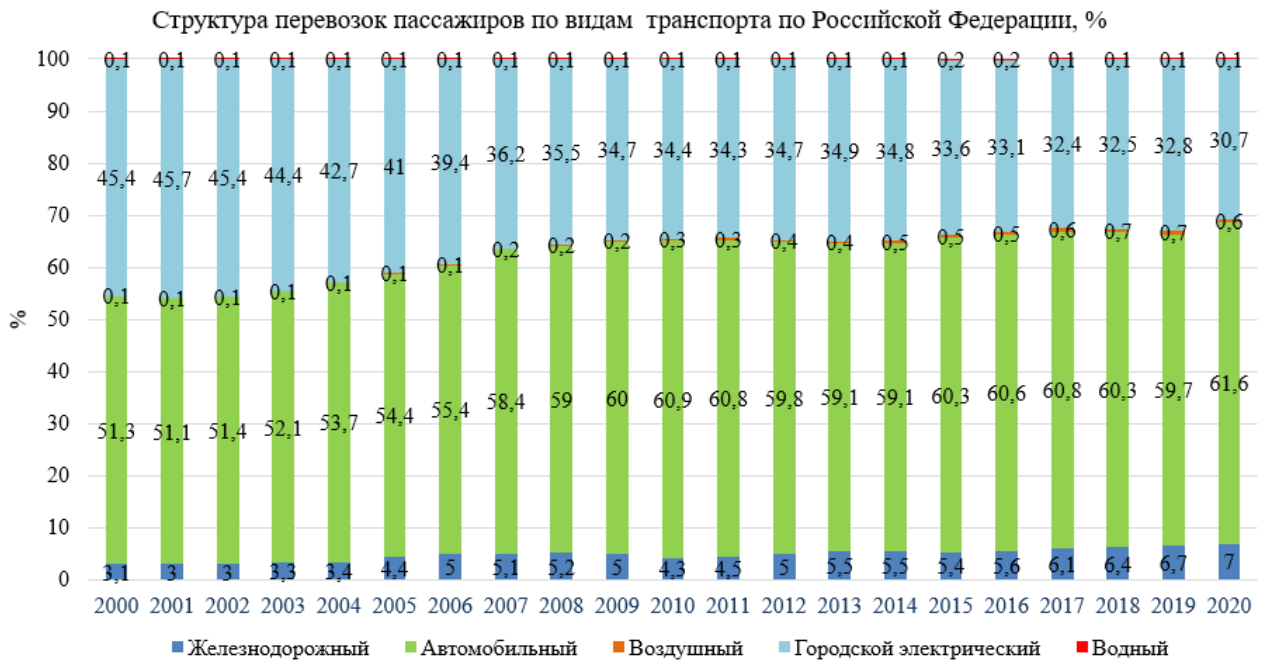


Рис. 1. Структура перевозок пассажиров по видам транспорта в Российской Федерации (в процентах с 2000 по 2020 год)

Главным конструкционным материалом в машиностроении является сталь. Однако с развитием технологий в автомобильной отрасли появились новые приоритетные направления развития: снижение расхода топлива, снижение выбросов CO_2, повышение безопасности автомобиля, использование полностью электрической или гибридной силовой установки в автомобиле [2]. Инструментом для решения приоритетных задач в машиностроительной отрасли является применение алюминиевых сплавов в конструкции автомобиля [3]. По состоянию на 2021 год потребление алюминия в машиностроении занимало более 10 % всего объема производства алюминия в мире. Ключевыми факторами повышенного спроса алюминия в машиностроении является увеличение производства автомобилей, а также количества их узлов и агрегатов, выполненных из алюминия. Так, доля алюминия в общем весе автомобиля выросла в среднем с 35 (1970-е годы) до 152 килограммов (2021 год), а к 2025 году доля алюминия может достигнуть 270 килограммов [4].

Использование алюминия в автомобилестроении позволяет достичь следующих результатов: уменьшить массу автомобиля, увеличить грузоподъемность, снизить расход топлива (и, как следствие, выбросы углекислого газа), улучшить динамику разгона и торможения, повысить безопасность автомобиля, поскольку алюминий обладает лучшими характеристиками энергопоглащения, чем сталь.

Способность алюминиевых сплавов гасить удар в 2–3 раза выше, чем у стали, и это ускорило их внедрение в автомобильную промышленность. Например, в автомобилях Tesla устанавливается трехуровневая система пассивной безопасности автомобиля, выполненная из алюминиевых сплавов. Первый уровень защиты представляет собой алюминиевый отбойник на днище Tesla Model S, выполненный в виде полого алюминиевого бруса специальной формы, который отбрасывает лежащие на дороге предметы, попавшие под автомобиль, вверх, направляя основной удар в район переднего багажника, тем самым защищая батарейный отсек и сохраняя управляемость автомобилем. Второй уровень защиты представляет собой восьмимиллиметровую непробиваемую плиту из алюминиево-титанового сплава, которая защищает батарейный отсек от повреждений. Третий уровень защиты — щит из штампованного алюминия, который рассеивает энергию удара и, если препятствие твердое и неподвижное, приподнимает автомобиль над ним [5].

Большое распространение в 2021 году получило применение алюминия в качестве основного материала при изготовлении кузова автомобиля. Это обусловлено тем, что деформации в алюминиевых конструкциях локализуются в компактных зонах, не давая деформироваться другим частям кузова, тем самым сохраняется максимальная безопасность той части автомобиля, где находятся пассажиры. Перспективным направлением для производителей автомобилей также является создание производств замкнутого цикла, в

которых идущие на лом алюминиевые детали утилизируемых автомобилей будут служить сырьем для изготовления запасных частей для новых транспортных средств.

Актуальность исследования в области пассивной безопасности транспортных средств обусловлена сложностью и недостаточной изученностью методов тестирования и виртуального моделирования динамических краш-тестов пассивных элементов безопасности автомобиля.

Именно системы пассивной безопасности автомобиля, выполненные из алюминия, стали предметом исследования, результаты которого представлены в данной статье.

Постановка задачи. Первоначальной задачей исследования являлся анализ эффективности использования алюминия в элементах пассивной безопасности автомобиля.

В качестве инструментального метода исследования использовалось моделирование устройства пассивной безопасности гоночного болида — энергопоглощающего элемента из алюминиевого сплава и его дальнейшее тестирование на энергопоглощающие свойства при фронтальном ударе (рис. 2) [6].



Рис. 2. Конструкция гоночного автомобиля, спроектированного по регламенту FSAE, с энергопоглощающим элементом (на рис. обозначен зеленым цветом)

В качестве исходных данных для твердотельного компьютерного моделирования и исследования энергопоглощающего элемента были приняты технические требования к объекту исследования из технического регламента проекта Formula SAE.

Требования технического регламента FSAE:

— согласно пункту T2.18.2 энергопоглощающий элемент должен быть установлен спереди передней перегородки рамы автомобиля, иметь размеры как минимум 100 мм в высоту и 200 мм в ширину на расстоянии не менее 200 мм от передней перегородки вдоль оси рамы, надежно закреплён на передней перегородке (при помощи клея, сварки или болтового соединения);

— согласно пункту T2.18.3 на всех транспортных средствах должна быть интегрирована защитная пластина из алюминия толщиной 4 мм или из конструкционной стали толщиной 1,5 мм;

— согласно пункту T2.20.1 тестирование энергопоглощающего элемента проводится при помощи жесткого фронтального удара (под углом 90°) при скорости автомобиля 7 м/с. В результате тестирования энергопоглощающего элемента общее количество поглощенной энергии должно составлять не менее 7 350 Дж, а максимальная перегрузка не должна превышать 40 g [7].

Результаты исследования могут быть применены машиностроительными предприятиями при выборе и обосновании эффективности использования алюминия в качестве основного материала для пассивных элементов безопасности автомобиля.

Теоретическая часть. Для решения поставленной задачи в качестве материала изготовления энергопоглощающего элемента был выбран алюминиевый сплав 6063 (AW-6063), химический состав которого представлен в табл. 1 [8].

Таблица 1

Химический состав алюминия 6063

Химический состав сплава 6063 по стандартам EN 573-3									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Прочие элементы	
0,2–0,6	0,35	0,1	0,1	0,45–0,9	0,1	0,1	0,1	0,05	0,15

Алюминий 6063 — это алюминиевый сплав с магнием и кремнием в качестве легирующих элементов. Стандарт контроля его состава поддерживается Алюминиевой ассоциацией. Обычно он имеет хорошие механические свойства, поддается термообработке и сварке. Алюминий 6063 — наиболее распространенный сплав, используемый для изготовления профилей с фиксированным поперечным сечением (экструзии) алюминия. Он позволяет формировать сложные формы с очень гладкими поверхностями, пригодными для анодирования. Алюминий 6063 является алюминиевым сплавом повышенной пластичности и коррозионной стойкости. Коррозионная стойкость этого сплава высокая: он не склонен к коррозионному растрескиванию под напряжением независимо от состояния материала. Он подходит для автоматизированных сборочных операций, поскольку хорошо сваривается дуговой сваркой в среде инертного газа.

Механические свойства алюминия 6063 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства алюминия 6063

Удельный вес	2690 кг/м^3 (2,69 г/см^3 при 20° С)
Предел прочности (временное сопротивление разрыву), мин., Rm, МПа	240
Предел текучести, мин., Rp0,2 в Н/мм^2	215
Относительное удлинение, мин., %	11
Твердость по Бринеллю, HB макс.	78
Модуль упругости при растяжении, МПа	68300
Модуль упругости при сдвиге, МПа	25800
Модуль упругости при сжатии, МПа	69700
Коэффициент температурного расширения, µm/m–C	23,4
Коэффициент Пуассона	0,33

Расположение алюминия 6063 в сетке других сплавов алюминия в зависимости от процентного содержания Si (кремния) и Mg (магния) приведено на рис. 3.

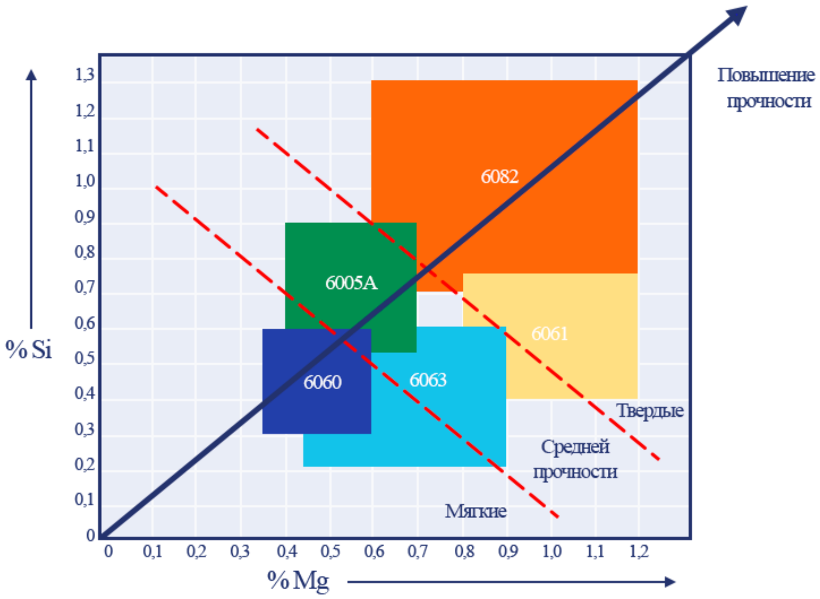


Рис. 3. Сетка расположение алюминиевых сплавов в зависимости от процентного содержания кремния и магния

Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что алюминиевый сплав 6063 имеет механические свойства, позволяющие использовать его в производстве пассивных элементов безопасности, требующих от материала достаточной прочности и способности к управляемой деформации при рассчитанных нагрузках.

Для моделирования конструкций энергопоглощающих элементов было использовано программное обеспечение Ansys SpaceClaim (САПР). Форма и структурное расположение энергопоглащающего элемента выбирались исходя из способности энергопоглощающего устройства к структурной деформации алюминиевого сплава в процессе изготовления энергопоглощающего элемента.

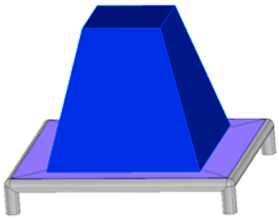
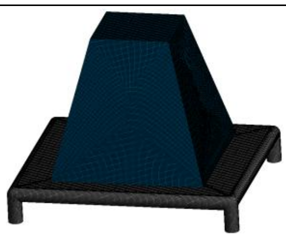
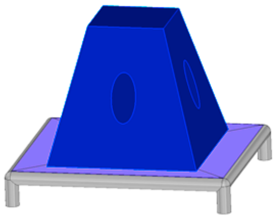
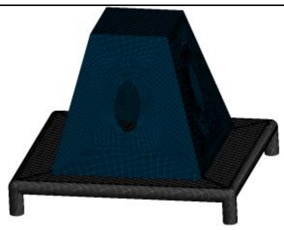
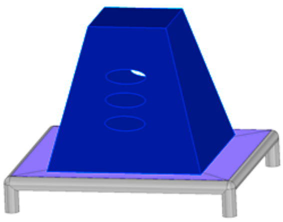
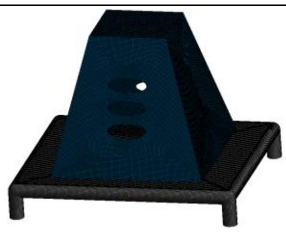
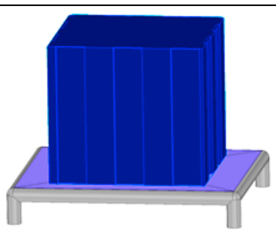
В качестве перспективных моделей энергопоглощающих элементов из алюминия были разработаны модели конструкций, которые представлены в табл. 3. В качестве метода построения конечно-разностной сетки был выбран Automatic method (автоматический метод) в Ansys Explicit Dynamics с установленным размером элементов 2 мм [9].

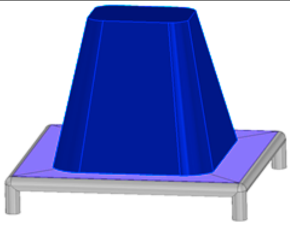
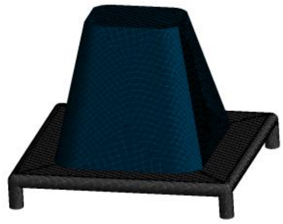
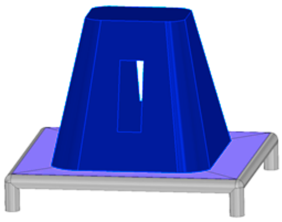
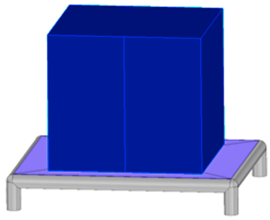
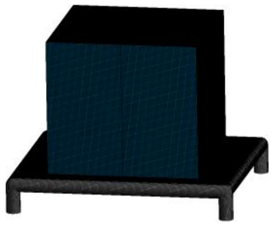
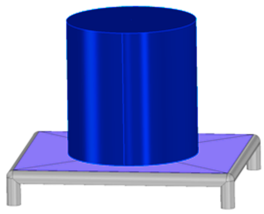
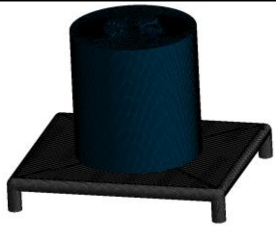
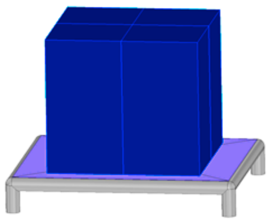
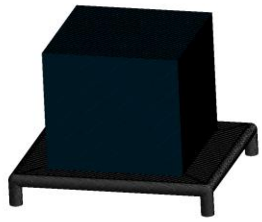
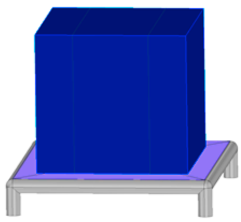
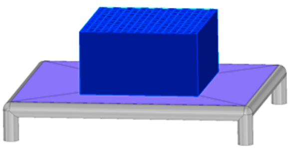
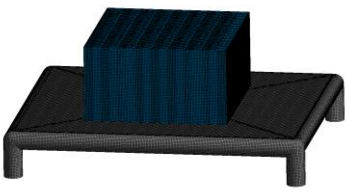
Выбор размера элементов сетки обусловлен конструкцией модели энергопоглощающих элементов, а также возможностью провести точное исследование распределения нагрузок в ЭПЭ в момент столкновения [10].

Количество узлов и элементов сетки разработанных моделей энергопоглощающих элементов также представлено в табл. 3.

Таблица 3

Перспективные модели энергопоглощающих элементов из алюминия 6063
и их сетка конечных элементов

№	Структурное наименование	3D модель	Сетка конечных элементов	Характеристика сетки
1	Энергопоглощающий элемент вида усеченной пирамиды			Statistics Nodes 145685 Elements 145167
2	Энергопоглощающий элемент вида усеченной пирамиды с четырьмя технологическими отверстиями			Statistics Nodes 142751 Elements 142056
3	Энергопоглощающий элемент вида усеченной пирамиды с шестью технологическими отверстиями			Statistics Nodes 143989 Elements 143265
4	Энергопоглощающий элемент прямоугольного вида из алюминиевого профиля			Statistics Nodes 186165 Elements 185276

№	Структурное наименование	3D модель	Сетка конечных элементов	Характеристика сетки
5	Энергопоглощающий элемент вида сглаженной усеченной пирамиды			Statistics Nodes 141020 Elements 140456
6	Энергопоглощающий элемент вида сглаженной усеченной пирамиды с двумя технологическими прямоугольными отверстиями			Statistics Nodes 138789 Elements 138065
7	Энергопоглощающий элемент двухсекционного вида			Statistics Nodes 185729 Elements 184826
8	Энергопоглощающий элемент цилиндрической формы			Statistics Nodes 149332 Elements 149022
9	Энергопоглощающий элемент четырехсекционной конструкции			Statistics Nodes 211941 Elements 211065
10	Энергопоглощающий элемент трехсекционной конструкции			Statistics Nodes 212056 Elements 211035
11	Энергопоглощающий элемент из алюминиевых сот			Statistics Nodes 465640 Elements 366902

В процессе исследований, разработки и расчетов энергопоглощающих элементов необходимо принять во внимание тот факт, что метод конечных элементов — FEM (Finite Element Method) — приближенный метод, точность которого зависит от допущений, связанных с типом элемента и размером сетки. В элементах конструкции энергопоглощающего элемента, где происходят изменения напряжений и деформаций на порядок

и более, требуется более плотная сетка. В элементах, подверженных практически постоянному напряжению, с минимальной разницей значений, а также в элементах, не требующих точного исследования, применяется редкая сетка, с большим размером элементов. При формировании сетки конечных элементов (КЭ) могут быть использованы одновременно как элементы треугольной, так и прямоугольной формы, при этом сетка строится без промежутков между элементами (рис. 4).



Рис. 4. Пример сетки КЭ модели энергопоглощающего элемента и жесткого препятствия

Динамическое исследование (краш-тест) проводился с использованием программного обеспечения Ansys Workbench с установленным программным пакетом динамического анализа Explicit Dynamics (рис. 5).

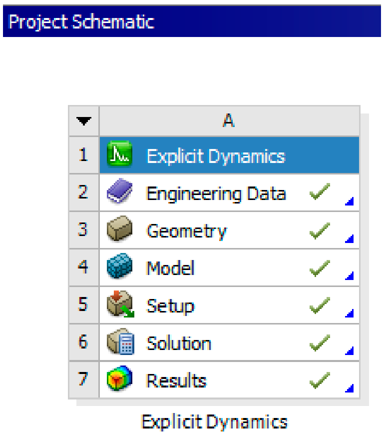


Рис. 5. Структура проекта динамического исследования Ansys

Проект динамического исследования состоит из следующих основных элементов (этапов):

— Engineering Data — является базой материалов, в которой можно как выбирать и настраивать готовые материалы, так и добавлять свои;

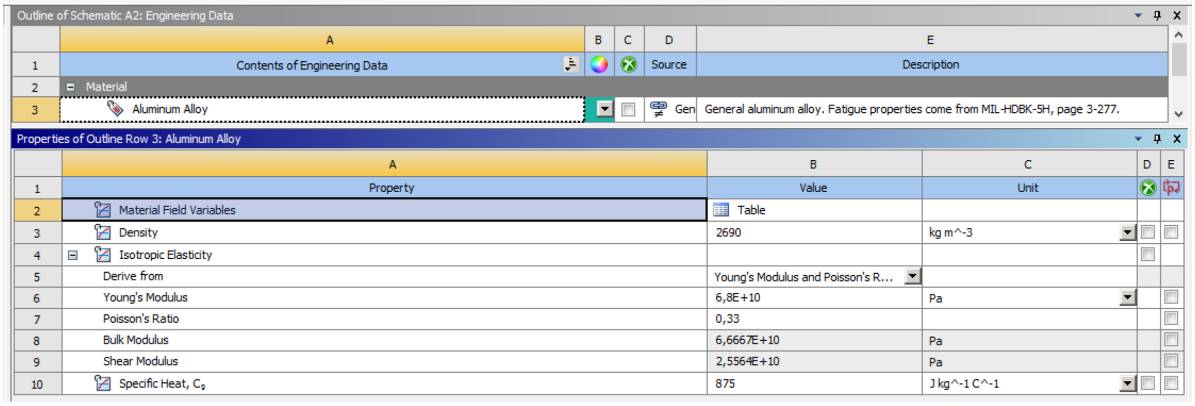
— Geometry — является средой разработки моделей, структур, поверхностей, позволяет загружать готовую модель в проект или разработать её с нуля;

— Model — система, объединяющая геометрию, выбранные материалы, координатную систему, соединения в сборке, сетку КЭ модели и настройки проведения исследований (Setup). Данный раздел позволяет выбрать область динамического исследования и по окончании расчетов сразу вывести результаты в графически интерактивном виде;

— Solution — расчеты входят в подраздел Model, можно экстраполировать в другие системы анализа;

— Results — результаты проведенных расчетов по исследуемым показателям (деформации, напряжения, изменения скорости, перемещения и т. д.).

Все данные по материалу вносятся в раздел Engineering Data (рис. 6).


Outline of Schematic A2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Aluminum Alloy			Gen	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.

Properties of Outline Row 3: Aluminum Alloy

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2690	kg m^-3		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's R...			
6	Young's Modulus	6,8E+10	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,33			
8	Bulk Modulus	6,6667E+10	Pa		
9	Shear Modulus	2,5564E+10	Pa		
10	Specific Heat, C_p	875	J kg^-1 C^-1		

Рис. 6. Карточка материала алюминиевого сплава 6063 (AW-6063) в Ansys Engineering Data

От выбора способа проектирования зависят скорость расчета программным обеспечением и требования, предъявляемые к оборудованию разработчика. Модель энергопоглощающего элемента должна быть расположена вплотную к виртуальному препятствию (под углом 90°), это позволяет в ходе расчета своевременно получать необходимую информацию и данные о процессах, происходящих во время столкновения (рис. 7).

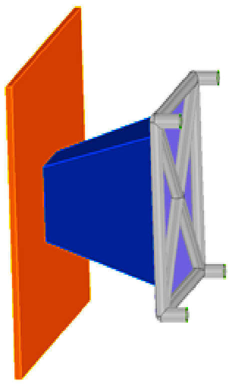
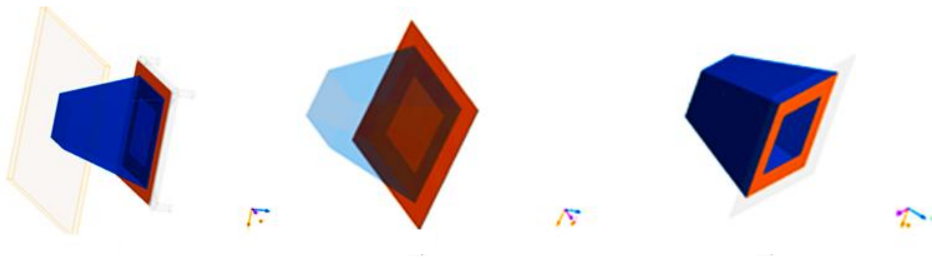


Рис. 7. Пример расположения энергопоглощающего элемента перед жестким препятствием

После установки материалов для всех компонентов сборки настраиваются связи (контакты) между узлами сборки (рис. 8). Настройка контактов компонентов осуществляется в подразделе Connection. Так, обязательным условием для корректного исследования является отсутствие связи (контакта) энергопоглощающего элемента с препятствием, поскольку данные объекты в реальных условиях ничем не связаны. При исследовании были установлены следующие связи (контакты) компонентов:

— рама автомобиля — фронтальная площадка;

— фронтальная площадка — энергопоглощающий элемент.



а) *б)* *в)*

Рис. 8. Пример установки контактов между энергопоглощающим элементом и фронтальной площадкой, установленной на раме автомобиля: а) общий вид контактов в модели конструкции энергопоглощающих элементов; б) контакт между рамой автомобиля и фронтальной площадкой; в) контакт между энергопоглощающим элементом и фронтальной площадкой

После создания сетки и установки контактов в сборке происходит формирование ограничений в модели и задается скорость движения сборки фронтальной части автомобиля (рис. 9). При моделировании фиксируются контур и задняя стенка препятствия, а также вводятся ограничения в смещении рамы автомобиля. Скорость удара энергопоглощающего элемента о жесткое препятствие, согласно техническому регламенту Formula SAE, принимается равной 7 м/с (для данных операций применяются функции Fixed Support, Displacement, Velocity).

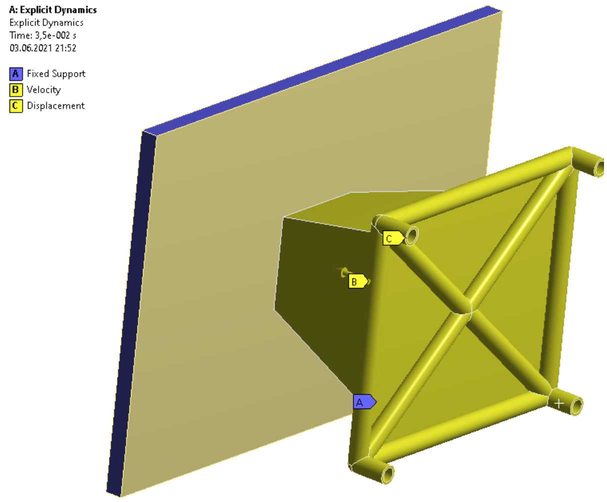


Рис. 9. Настройка перемещений испытуемого образца энергоплагащающего элемента для проведения краш-теста

На последнем технологическом этапе настраиваются параметры проведения динамического испытания при помощи модуля Analysis Setting и выбираются необходимые показатели для расчёта (рис. 10).

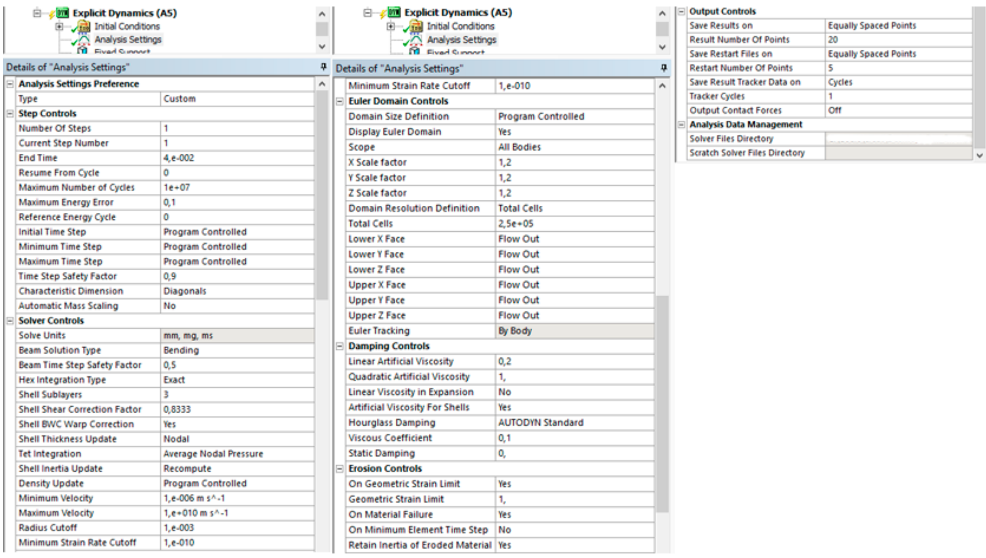


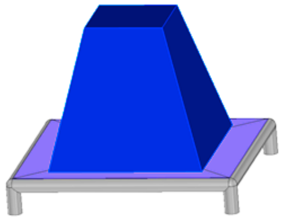
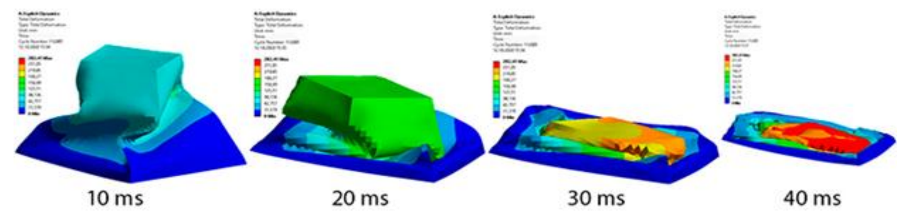
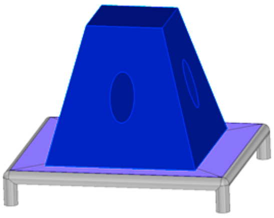
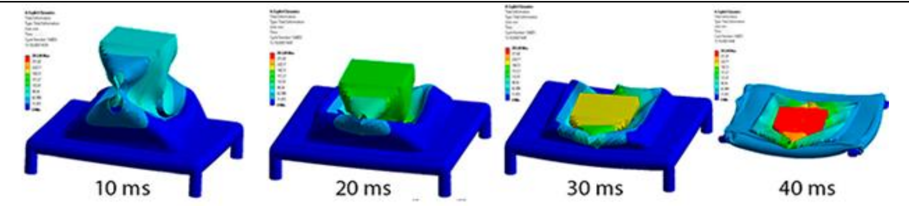
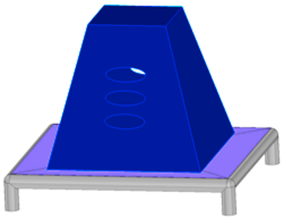
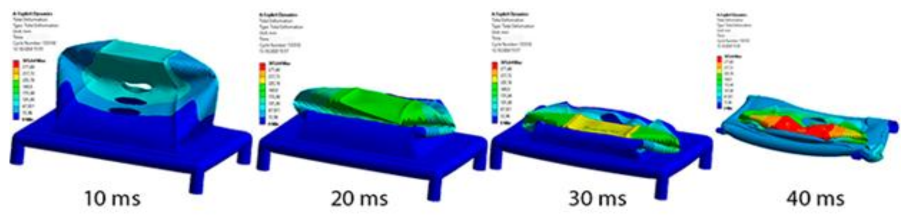
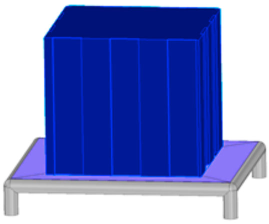
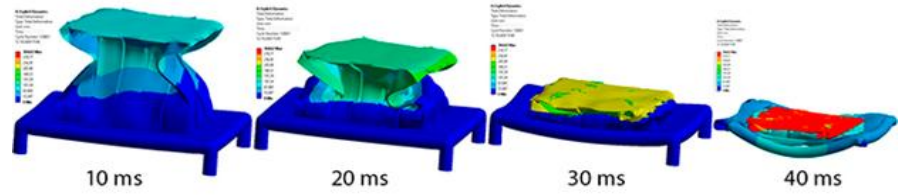
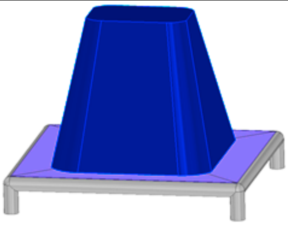
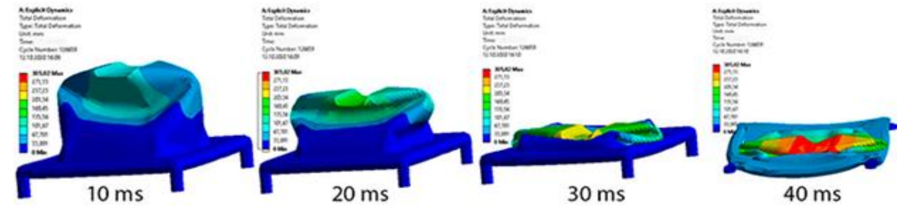
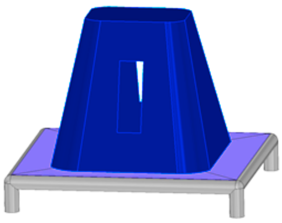
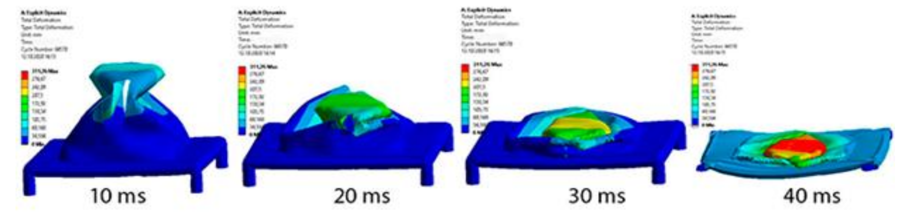
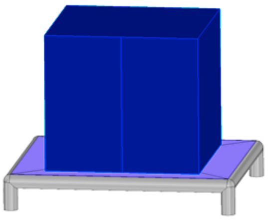
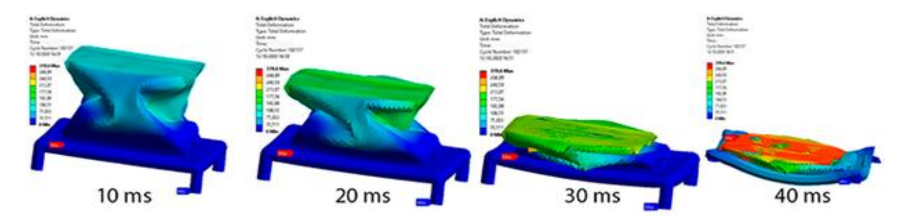
Рис. 10. Настройка параметров проведения динамического испытания Analysis Setting

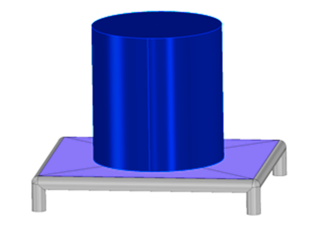
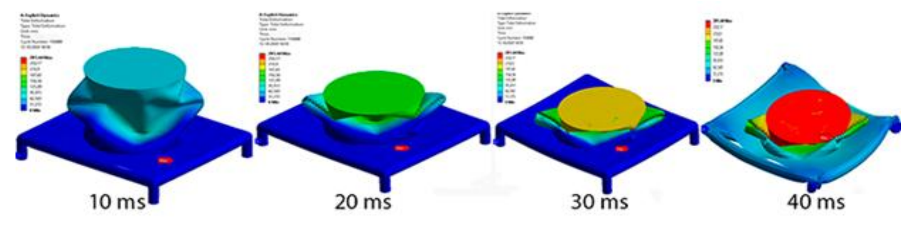
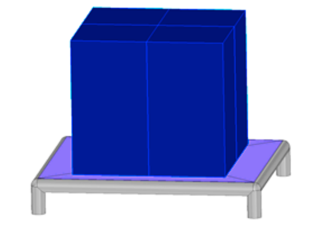
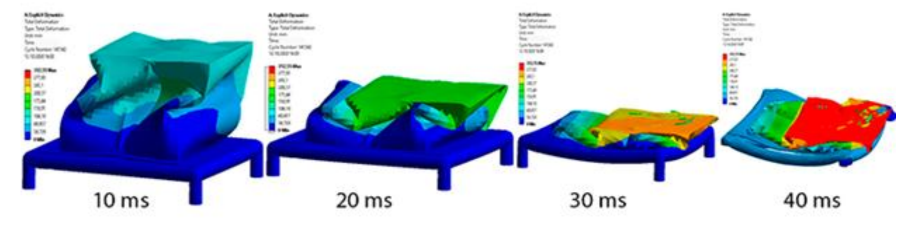
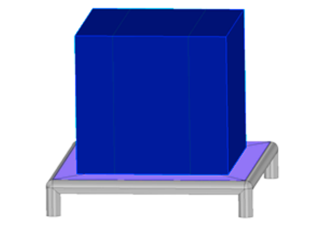
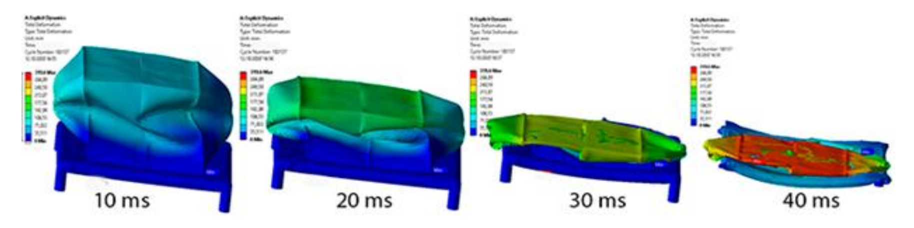
В настройках рекомендуется устанавливать конечное время расчета (End Time) не более 50 мс (0,05 с), поскольку в среднем за 40 миллисекунд происходит полное гашение удара и последующий отскок автомобиля. При времени симуляции 40 миллисекунд производится в среднем 126000–150000 расчетных операций-циклов.

Для поиска наиболее перспективных конструкционных решений энергопоглощающих элементов из алюминиевого сплава и их дальнейшего анализа были проведены краш-тесты с фиксацией показаний в диапазоне от 0 до 40 миллисекунд. Результаты проведенных испытаний отображены в табл. 4.

Таблица 4

Деформации энергопоглощающих элементов в четыре момента времени после удара
(10–20–30–40 миллисекунд)

№	3D Модель	Деформация энергопоглощающего элемента
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

№	3D Модель	Деформация энергопоглощающего элемента
8		
9		
10		

По результатам проведенного компьютерного моделирования для дальнейшего анализа и выбора перспективных конструкций энергопоглощающих элементов были сформированы сводные графики деформации и эффективно поглощенной энергии (рис. 11, 12).

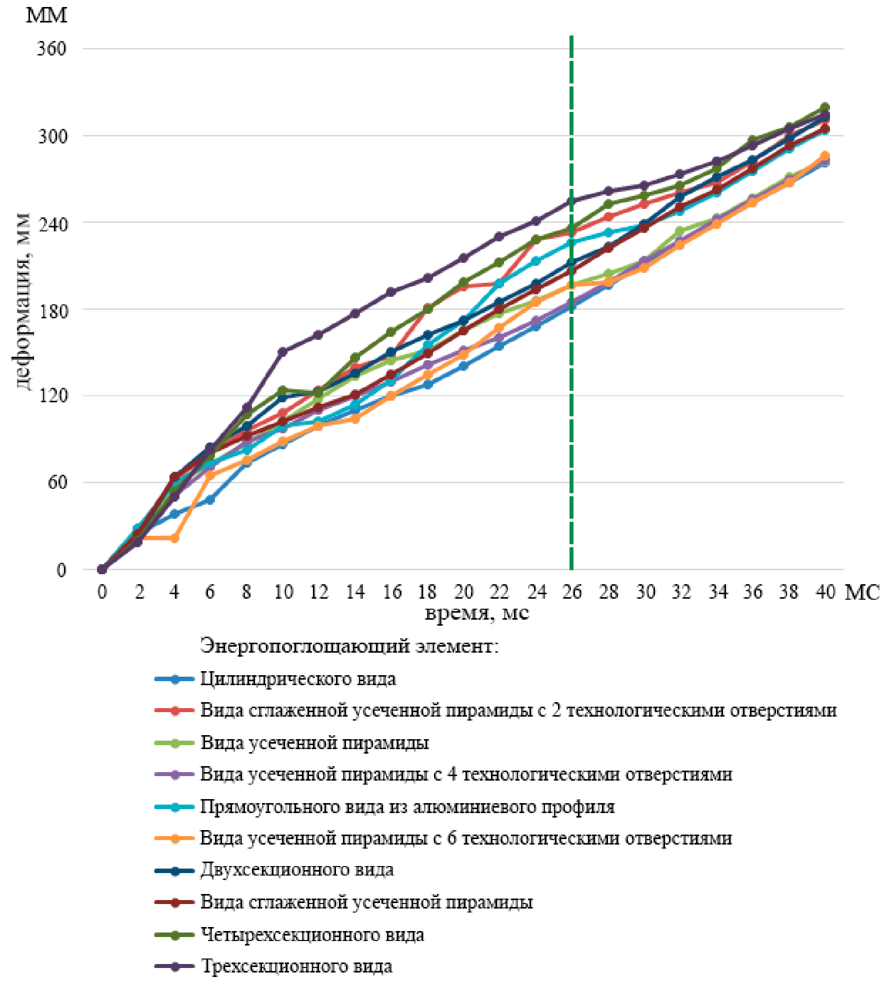


Рис. 11. Диаграмма деформации энергопоглощающих элементов в диапазоне времени 0–40 миллисекунд

Зеленой линией на рис. 11 ограничена зона от 0 до 26 миллисекунд. В этот диапазон времени происходила наибольшая эффективная деформация (Effective Plastic Strain) энергопоглощающего элемента, в ходе которой он не деформировался или испытывал незначительные смещения пространственный каркас автомобиля.

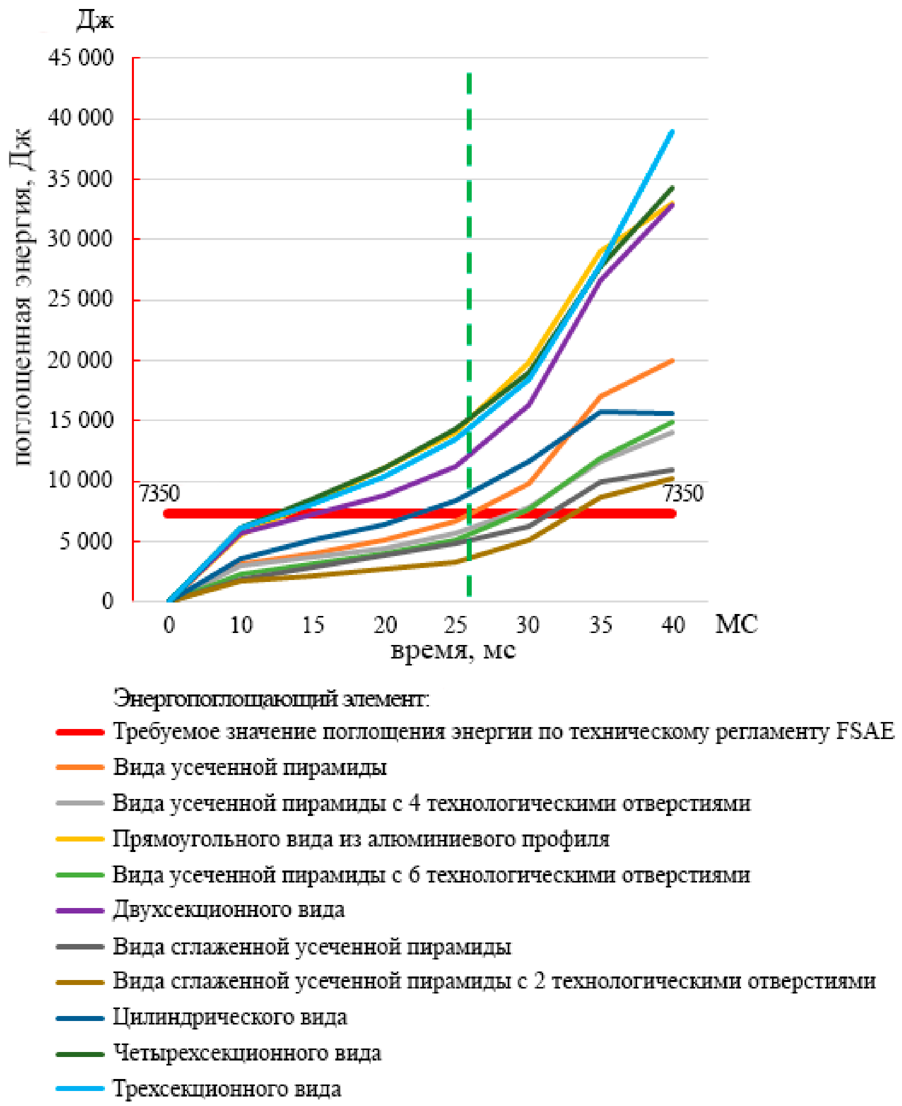
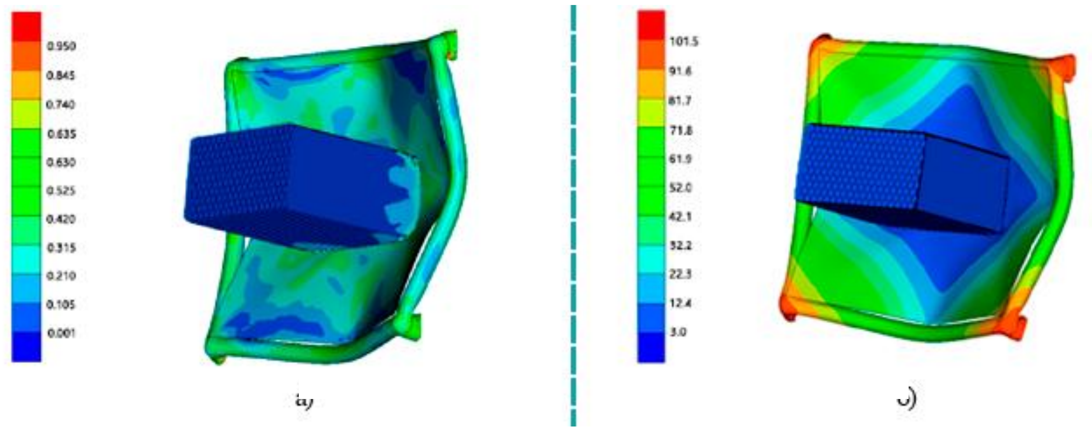


Рис. 12. Диаграмма поглощенной энергии (Дж) энергопоглощающими элементами в диапазоне времени 0–40 миллисекунд

Зеленой линией на рис. 12 также ограничена зона от 0 до 26 миллисекунд. В данный диапазон времени энергопоглощающий элемент поглощал поступающую энергию путем собственной деформации без серьезных повреждений остальных элементов автомобиля. Верхнее значение этого временного диапазона (26 миллисекунд) — это время, за которое энергопоглощающий элемент из алюминиевого сплава способен эффективно гасить удар, при правильно рассчитанной конструкции это происходит без значительных перегрузок.

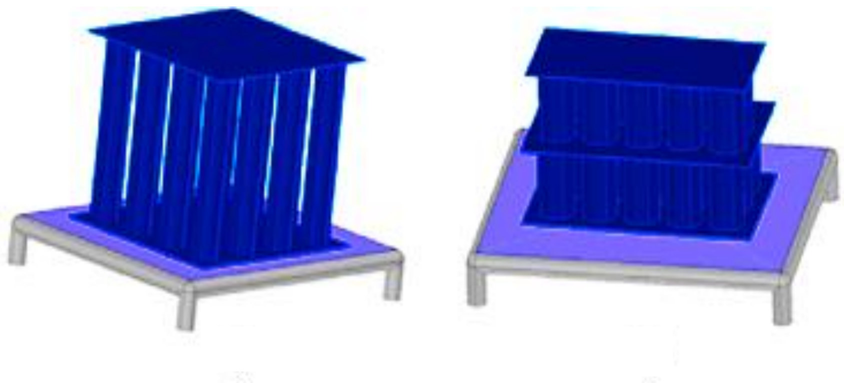
Результаты расчёта показали, что конструкция энергопоглощающего элемента из алюминиевых сот не удовлетворяет требованиям безопасности технического регламента Formula SAE. Жесткость данного конструкции оказалось слишком большой, что стало причиной преждевременной деформации фронтальной пластины и рамы автомобиля, а возникающие перегрузки >20 g не позволяют использовать данный пассивный элемент безопасности в автомобиле Formula SAE (рис. 13).



а) *б*)

Рис. 13. Напряжения и деформации в энергопоглощающем элементе из алюминиевых сот:
а) напряжения в энергопоглощающем элементе из алюминиевых сот (ГПа);
б) деформация в энергопоглощающем элементе из алюминиевых сот (мм)

Дополнительно были исследованы энергопоглощающие многосоставные элементы с цилиндрическими конструкциями, но они оказались абсолютно неэффективными (рис. 14). Высокая жесткость конструкции не позволила в достаточном количестве гасить удар за счет деформации энергопоглощающего элемента, поэтому использование данных конструкций в автомобиле, выполненном по регламенту Formula SAE, исключено.



а) *б*)

Рис. 14. Многосоставные энергопоглощающие элементы:
а) одноуровневый энергопоглощающий элемент с 16 цилиндрами; б) двухуровневый энергопоглощающий элемент с 15 цилиндрами на первом и 10 цилиндрами на втором уровне

Для дальнейшего анализа проблемы была сформирована градация энергопоглощающих элементов по их эффективности, которая построена по совокупным качествам (рис. 15). Они включают в себя способность поглощать достаточное количество поступающей энергии, осуществлять гашение удара без превышения допустимых показателей перегрузки, способность к деформации без преждевременного разрушения или смещения энергопоглощающего элемента.



Рис. 15. Градация энергопоглощающих элементов по эффективности

Дальнейшее исследование производилось только для энергопоглощающих элементов категории «высокая эффективность». Данные для графиков формировались с контрольной точки, расположенной по центру пересечения фронтальных труб пространственного каркаса безопасности автомобиля (рис. 16).

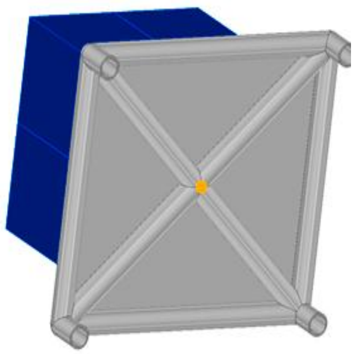


Рис. 16. Контрольная точка (обозначена желтым цветом) на конструкции энергопоглощающего элемента

Графики перемещения, скорости и ускорения для контрольной точки эффективных вариантов конструкции энергопоглощающих элементов представлены на рис. 17, 18.

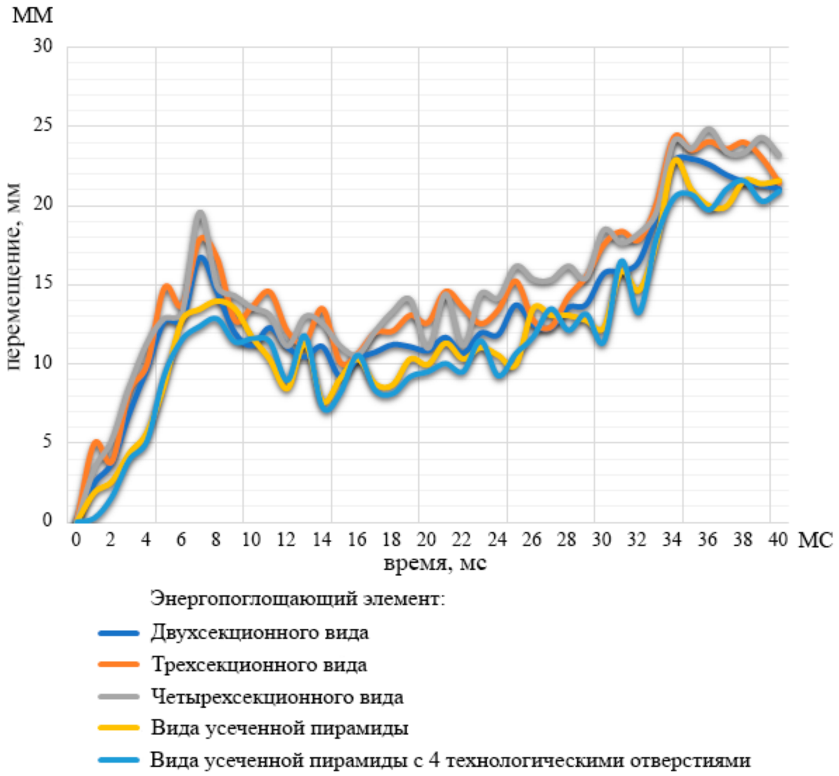


Рис. 17. График зависимости перемещения энергопоглощающей конструкции от времени (результаты получены с контрольной точки рис. 16)

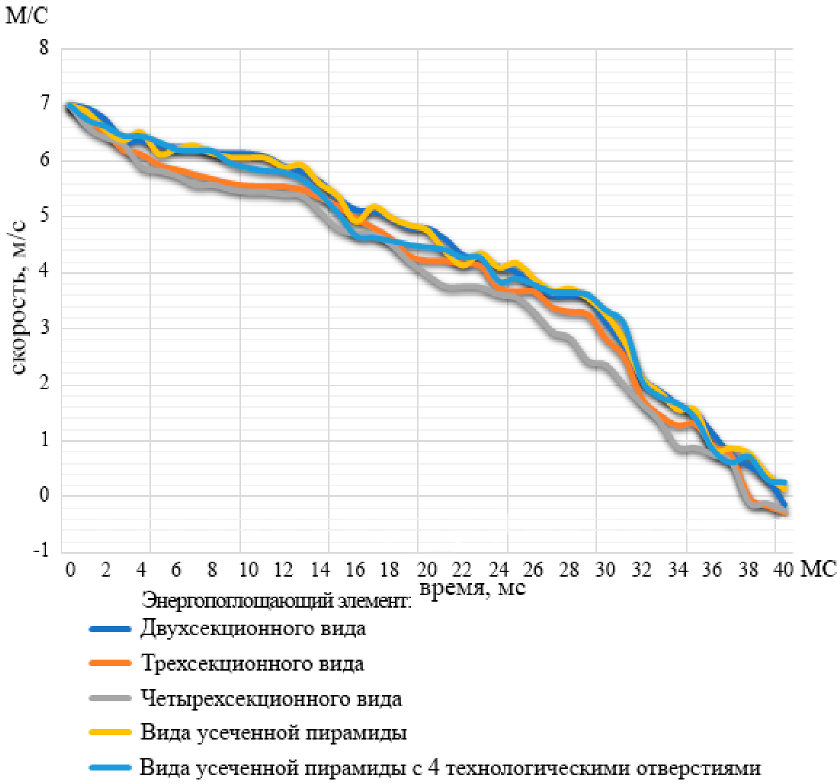


Рис. 18. График зависимости скорости замедления энергопоглощающей конструкции от времени (результаты получены с контрольной точки рис. 16)

В процессе симуляции были идентифицированы основные зоны концентрации напряжений (рис. 19). Так, установлено, что основным нагрузкам подвергается пересечение (центр) диагональных труб пространственной рамы, угловые элементы фронтальной части каркаса автомобиля, периметр пластины, к

которой крепится энергопоглощающий элемент, в местах структурных сгибов и креплений энергопоглощающего элемента.

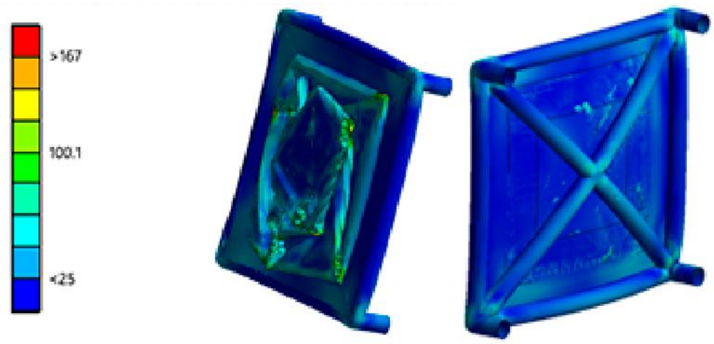
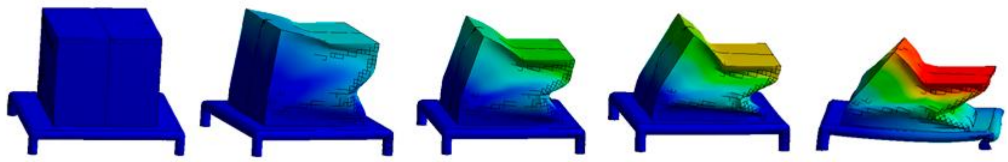


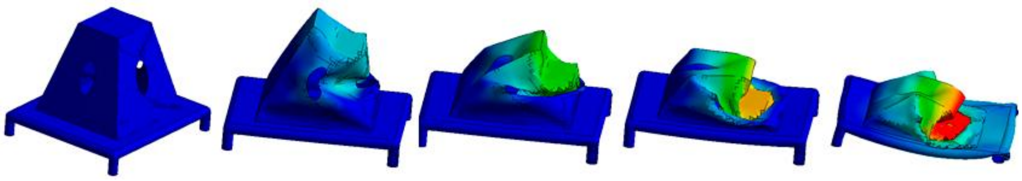
Рис. 19. Места интенсивной концентрации накопленных напряжений (ГПа)

На основе компьютерного моделирования можно сделать вывод о том, что все представленные энергопоглощающие элементы из категории «высокая эффективность» могут использоваться в качестве пассивной системы безопасности гоночного болида. Категория эффективных энергопоглощающих элементов имеет хорошо прогнозируемое смятие в случае фронтального удара. Дополнительно несколько конструкций было протестировано фронтальным ударом с 40-процентным перекрытием, которое считается самым сложным и тяжелым тестированием элементов безопасности из существующих (рис. 20) [11].



0 мс 10 мс 20 мс 30 мс 40 мс

а)



0 мс 10 мс 20 мс 30 мс 40 мс

б)

Рис. 20. Краш-тест энергопоглощающих элементов с 40-процентным перекрытием:
а) ЭПЭ двухсекционного вида; б) ЭПЭ вида усеченной пирамиды
с четырьмя технологическими отверстиями

Тестирование энергопоглощающего элемента с 40-процентным перекрытием считается успешным, если в результате столкновения не была преждевременно разрушена конструкция элемента и сохранена его устойчивость на фронтальной пластине. В результате тестирования краш-тестом с 40-процентным перекрытием испытуемых образцов энергопоглощающих элементов из алюминия можно сделать вывод о том, что податливость материала позволяет выдерживать деформации в конструкции без разрушения, сдвигов и с максимально возможным распределением (в случае частичного контакта энергопоглощающего элемента и препятствия) напряжений и нагрузок по всей конструкции указанного элемента.

Энергопоглощающие элементы из категории «высокая эффективность» отличаются стабильностью при проведении экспериментальных краш-тестов: конструкционное смещение относительно горизонтальной оси не существенное и соответствует требованиям технического регламента FSAE. Поглощение энергии и перегрузки также соответствуют техническому регламенту FSAE.

Проанализировав полученные данные по неэффективным конструкциям энергопоглощающих элементов, следует отметить пропорциональное распределение поглощённой энергии отдельными конструкционными элементами автомобиля. При ударе энергопоглощающего элемента низкой эффективности (например, из алюминиевых сот или многосоставного) не поглощается требуемое количество энергии (7350 Дж), при этом наибольшую величину поглощенной энергии берет на себя передняя перегородка автомобиля или опора пластины. Второй по значимости (уровню) поглощения поступающей энергии является

пластина, к которой крепится энергопоглощающий элемент. Остальную энергию поглощает рама автомобиля. Энергопоглощающие элементы в случае недостаточной или избыточной конструкционной жесткости поглощают лишь 15–35 % от требуемой энергии, что является недопустимым для использования в качестве основного деформируемого элемента. Процентное отношение поглощаемой энергии при ударе конструкционными элементами автомобиля приведено в табл. 5.

Таблица 5

Процентное отношение поглощаемой энергии конструкционными элементами автомобиля

Наименование конструкционного элемента автомобиля	Высокая эффективность	Средняя эффективность	Низкая эффективность
1	2	3	4
Энергопоглощающий элемент	65–100 %	35–65 %	15–35 %
Передняя пластина	5–15 %	15–25 %	20–35 %
Каркас болида	5–15 %	10–25 %	15–45 %

Представленные энергопоглощающие элементы (за исключением низкоэффективных согласно таблице градации по эффективности энергопоглощающих элементов) по общей поглощенной энергии удовлетворяют предъявляемым требованием технического регламента FSAE. Однако всегда возможно улучшение конструкции энергопоглощающего элемента за счет конструкционных изменений и корректировки состава алюминиевого сплава.

Из научных публикаций известно, что энергопоглощающие элементы конической формы или вида усеченной пирамиды эффективнее других позволяют управлять процессом энергопоглащения при соударении автомобиля с жесткой преградой (рис. 21) [12].



Рис. 21. Модель энергопоглощающего элемента с пазовой системой крепления, зафиксированной клеевой основой Impax

Также было обнаружено, что конструктивные особенности энергопоглощающих элементов (технологические отверстия, изгибы профиля и так далее) позволяют управлять не только прохождением деформации, но и геометрической устойчивостью конструкции. В ходе анализа деформации энергопоглощающих элементов, обладающих эллиптическими (или другой формы) технологическими отверстиями, установлено, что они эффективно перераспределяют энергию деформации по всей конструкции в процессе столкновения автомобиля с препятствием.

В случаях недостаточной жесткости конструкции энергопоглощающих элементов происходит либо его преждевременное разрушение, либо незначительное поглощение энергии со значительным смещением всей конструкции. Поэтому разработчикам пассивных систем безопасности, в частности энергопоглощающих элементов, следует принимать во внимание возможное перераспределение энергии между элементами системы безопасности. Так, изменяя конструкционную форму, размер и материал изготовления энергопоглощающего элемента, можно перераспределять энергию в процессе соударения.

Проектируя пассивные элементы безопасности, в том числе энергопоглощающие элементы автомобиля, следует учитывать сильное влияние формы и размеров конструкции на ее устойчивость при деформировании. В процессе разработки эффективного энергопоглощающего элемента необходимо добиваться деформирования конструкции по всей его осевой длине.

Выводы. Результаты проведенного исследования различных конструкций энергопоглощающих элементов свидетельствуют о том, что распределение напряжений и деформаций в них зависит от формы, размеров и материала изготовления ЭПЭ. При моделировании и дальнейших испытаниях энергопоглощающих элементов необходимо добиваться прохождения деформирования конструкции по всей ее длине.

Установлено, что потеря устойчивости конструкции энергопоглощающего элемента приводит к увеличению его деформации, что влечет за собой разрушение испытуемого образца.

На основе моделирования поведения разработанных вариантов конструкций энергопоглощающих элементов при фронтальном ударе установлено:

— для жестких (недеформируемых) энергопоглощающих элементов деформация определяется перемещением передней стенки автомобиля;

— для энергопоглощающих элементов низкой и средней жесткости основная часть перемещения (деформации) во время удара происходит за счет деформации энергопоглощающего элемента;

— анализ напряжений типовых конструкций энергопоглощающих элементов, возникающих при ударе о жесткое препятствие, показал, что основные зоны максимальной концентрации напряжений расположены в середине труб фронтальной части каркаса автомобиля, в местах крепления передней (фронтальной) пластины, а также в местах перегиба стенки энергопоглощающего элемента;

— наибольшее падение скорости автомобиля наблюдается в момент начала деформации передней пластины, когда деформации самого энергопоглощающего элемента уже недостаточно. Как правило, это период времени с 30 до 40 миллисекунд.

Анализ деформации энергопоглощающего элемента, передней стенки и рамы позволил установить связанность всех конструктивных элементов гоночного автомобиля в области обеспечения пассивной безопасности. При избыточной поступающей кинетической энергии каждый конструкционный элемент распределяет и поглощает определенный процент энергии.

Библиографический список

1. Транспорт. Основные итоги работы транспорта. Пассажирооборот по видам транспорта по Российской Федерации / Федеральная служба государственной статистики : [сайт]. — URL: https://rosstat.gov.ru/folder/23455 (дата обращения : 01.02.2022).

2. Johannesson, P. Guide to Load Analysis for Durability in Vehicle Engineering / P. Johannesson, M. Speckert // Chichester, United Kingdom : John Wiley and Sons, 2013. — 456 p. http://dx.doi.org/10.1002/9781118700518

3. Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness. / A. Hallal, A. M. Elmarakbi, A. Shaito, H. H El-Hage // Sunderland, United Kingdom: John Wiley and Sons, 2013. — P. 1–28. http://dx.doi.org/10.1002/9781118535288.ch1

4. Автомобилестроение / Алюминиевая ассоциация : [сайт]. — URL: https://www.aluminas.ru/sectors/automotive/ (дата обращения : 01.02.2022).

5. Применение алюминия. Алюминий в транспорте / Сайт об алюминии : [сайт]. — URL: https://aluminiumleader.ru/application/transport/ (дата обращения : 01.02.2022).

6. Жидков, А. В. Применение системы Ansys к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А. В. Жидков. — Нижний Новгород : Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2006. — 115 с.

7. Технобаттл «Формула Студент 2021». Регламент соревнований / Formula Student Russia : [сайт]. — URL: http://fstudent.ru/documents (дата обращения : 01.02.2022).

8. 6063. Алюминиевый сплав. Деформируемые сплавы / Aluminium-guide.com : [сайт]. — URL: https://aluminium-guide.com/splavy/deformiruemye-splavy/ (дата обращения: 01.02.2022).

9. Ansys Autodyn / Cadfem Ansys : [сайт]. — URL: https://www.ansys.com/products/structures/ansys-autodyn (дата обращения : 01.02.2022).

10. Madenci, E. / The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS // E. Madenci, I. Guven // Boston, United States : Springer US, 2015. — 657 p. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4899-7550-8

11. Рейтинги / Министерство транспорта США (NHTSA) : [сайт]. — URL: https://www.nhtsa.gov/ratings (дата обращения : 01.02.2022).

12. Numerical-Experimental Correlation of Dynamic Test of a Honeycomb Impact Attenuator for a Formula SAE Vehicle / A. Vettorello, G. A. Campo, G. Goldoni, M. Giacalone // Metals - Open Access Metallurgy Journal. — 2020. — Vol. 10, iss. 5. — 22 p. http://dx.doi.org/10.3390/met10050652

Поступила в редакцию 21.02.2022
Поступила после рецензирования 03.03.2022
Принята к публикации 04.03.2022

Об авторах:

Жуков Леонид Александрович, магистрант кафедры «Транспортные средства и техносферная безопасность» Череповецкого государственного университета (162600, РФ, г. Череповец, пр. Луначарского, 5), ORCID, LA-Zhukov@mail.ru.

Кузьминов Александр Леонидович, профессор кафедры «Транспортные средства и техносферная безопасность» Череповецкого государственного университета (162600, РФ, г. Череповец, пр. Луначарского, 5), доктор технических наук, ORCID, 1954alk@gmail.com.

Заявленный вклад соавторов:

Л. А. Жуков — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, техническая разработка, проведение симуляций и расчетов, подготовка текста, анализ результатов и формирование выводов; А. Л. Кузьминов — научное руководство, технический нормоконтроль, анализ результатов исследования, доработка текста, корректировка выводов.